

作物病虫害遥感监测研究进展

张竞成^{1,2}, 袁琳^{1,2}, 王纪华^{1,2}, 罗菊花¹, 杜世州¹, 黄文江^{1,3*}

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029; 3. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094)

摘要: 农作物病虫害监测目前在数据采集上主要依靠植保人员田间调查、田间取样等传统方式, 不仅耗时、费力, 而且存在以点代面的代表性差、主观性强和时效性差等弊端, 难以满足大范围病虫害实时监测的需求。近年来遥感技术的发展, 为大面积、快速获取作物和环境信息提供了重要的手段, 是未来大面积病虫害监测和预测预报与产量损失评估的重要手段。该文在阐述植物病虫害胁迫光谱响应的生理机制的基础上, 对目前病虫害遥感监测中所常用的光谱敏感波段及植被指数进行了汇总、整理, 并对病虫害识别、严重度监测和损失评估等方面所使用的算法进行了综述。在此基础上, 指出了目前作物病虫害遥感监测中尚需解决的关键技术问题, 并就如何实现大面积作物病虫害遥感监测提出了解决思路。

关键词: 遥感, 病害, 虫害控制, 作物, 光谱特征波段, 植被指数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.20.001

中图分类号: S127; S431

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-20-0001-11

张竞成, 袁琳, 王纪华, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 1-11.
Yuan Lin, Zhang Jingcheng, Wang Jihua, et al. Research progress of crop diseases and pests monitoring based on remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(20): 1-11. (in Chinese with English abstract)

0 引言

农作物病虫害对农业生产造成巨大的损失。据联合国粮农组织估计, 世界粮食产量常年因病害损失 14%, 虫害损失 10%^[1]。病虫害的爆发和流行可以看作一个病菌或害虫的群落对农田生态系统的一种入侵或干扰过程。作为世界上最大的人工生态系统, 农田生态系统的生态脆弱性使得病虫害的入侵成为一个难以避免的现实。农作物病虫害从小范围发生到爆发或流行受到诸多因素的影响, 主要包括气候特点、作物品种、种植习惯以及防治情况等^[2]。在全球气候变化的大背景下, 农田生态系统受到病虫害胁迫的概率将显著增加, 这为全球粮食生产蒙上一层阴影。中国作为农业大国, 历史上受到病虫害的影响就非常严重, 重要的农作物病虫害鼠害达 1 400 多种, 具有种类多、影响大和局部暴发

成灾等特点。近年来, 中国病虫害的发生和危害出现加重的趋势, 如 2005 年的褐飞虱特大发生成灾, 造成长江中下游地区 670 万 hm² 的田块枯倒, 造成约几百万吨稻谷的损失, 直接经济损失约为 40 亿元^[3]。中国作为人口大国, 能够在数量和面积有限的耕地上取得丰收将直接关系到国民生活和国家的稳定。

目前, 中国在作物病虫害监测预报方面主要还是依靠植保人员的田间调查、田间取样等方式。这些传统方法虽然真实性和可靠性较高, 但耗时、费力, 且存在代表性、时效性差和主观性强等弊端, 已难以适应目前大范围的病虫害实时监测和预报的需求。遥感技术是目前唯一能够在较大范围内快速获取空间连续地表信息的手段, 其在农作物估产、品质预报和病虫害监测等多个方面有着不同程度的研究和应用。这些应用在很大程度上改变了传统的作业和管理模式, 极大地推动着农业朝优质、高效、生态、安全和现代化、信息化的方向发展。美国农业部 (USDA) 国家农业统计服务司 (NASS) 于 2009 年 5 月发布的一份最新报告了解到, 美国国家尺度作物生长状态及作物产量数据自 1995 年起开始利用卫星遥感数据进行分析, 该技术对快速、低成本地获得全国尺度的各种粮食种植品种、生长状态、产量等数据具有重要作用^[4]。目前, 随着精密制造技术和测控技术的发展, 各类机载、星载的遥感数据源不断增多, 为各级用户提供了多种

投稿日期: 2012-03-16 修改日期: 2012-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271412)、国家自然科学基金项目 (41101395) 和北京市自然科学基金项目 (4122032) 资助

作者简介: 张竞成 (1984—), 男, 浙江人, 博士, 助理研究员, 主要从事精准农业, 作物病虫害遥感以及农业生态遥感方面的研究。北京北京农业信息技术研究中心, 100097。

Email: zjc_19840222@gmail.com

*通信作者: 黄文江 (1974—), 男, 安徽人, 博士, 研究员, 主要从事农业定量遥感以及生态遥感方面的研究。北京北京农业信息技术研究中心, 100097。Email: huangwj@nercita.org.cn

时间、空间和光谱分辨率的遥感信息。而这些技术和数据的涌现为作物病虫害监测提供了宝贵的契机,使得有可能更为准确、快速地了解作物病虫害发生发展的状况。

本文通过对近年来遥感技术在作物病虫害方面的有关研究进行综述,从4个不同层面对这些研究进行介绍,即1)病虫害光谱响应生理机制;2)病虫害光谱响应特征位置;3)应用于病虫害监测的植被指数;4)病虫害遥感识别和程度区分算法。最后,对该技术在作物病虫害研究领域的现存问题及未来的发展趋势进行总结,探讨进一步应用的可行途径。

1 植物病虫害胁迫下光谱响应生理机制

光学遥感监测是目前植物病虫害监测中研究最为聚集、应用最为广泛的领域。植物在病虫害侵染条件下会在不同波段上表现出不同程度的吸收和反射特性的改变,即病虫害的光谱响应,通过形式化表达成为光谱特征后作为植物病虫害光学遥感监测的基本依据。植物病虫害的光谱响应可以近似认为是一个由病虫害引起的植物色素、水分、形态、结构等变化的函数,因此往往呈现多效性,并且与每一种病虫害的特点有关。

由于受各类色素(叶绿素、类胡萝卜素、花青素)的吸收作用,健康植株的光谱通常在可见光区域反射率较低;受叶片内部组织的空气-细胞界面的多次散射作用,在近红外区域往往反射率较高;受水、蛋白质和其他含碳成分的吸收作用,在短波红外区域呈现较低反射率^[5]。在受到病菌侵染后,植物叶片上常会形成不同形式的病斑、坏死或枯萎的区域,色素的含量和活性降低,导致可见光区域的反射率增加,同时红边(670~730 nm)向短波方向移动^[6]。另一方面,感病植株在胁迫较严重时会出现叶倾角变化甚至植株倒伏等冠层形态的变化,从而在较大程度上影响近红外波段的反射率光谱^[7]。健康植株受病虫害侵染达一定程度时,植株水分代谢受到干扰,引起叶片或植株的水分亏缺,进而引起近红外波段反射率的变化^[8-9]。同时,植株体含水量变化与植株形态等结构因素亦存在密切关系。但是,相对于色素而言,水分对光谱的影响具有更大的不确定性。多种病虫害(如小麦白粉病、条锈病)易发生于环境湿度较高的地方,此现象与病虫害对植株水分的影响方向相反,因此对二者的影像常难于区分。此外,在冠层尺度上,太阳光经大气时水汽被大量吸收,于近红外波段形成3个水汽吸收带。这一特点进一步加大了对植株体水分信息的提取

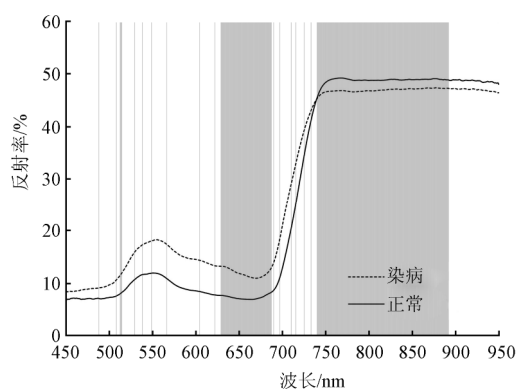
难度。因此,目前对于植物病虫害反射率光谱的研究,较多的还是考虑色素、细胞结构以及冠层结构的影响^[10-11]。

总体而言,目前植物病虫害胁迫下引起光谱响应的生理机制基本是明确的。这些机理为利用遥感技术研究感病植物在不同波段下的光谱响应变化奠定了理论依据。

2 作物病虫害胁迫下光谱响应特征位置

由于病虫害叶片或冠层光谱是对植物生理、生化、形态、结构等改变的整体响应,具高度复杂性,因此对于不同植物,不同类型、不同发展阶段的病虫害,可能会有多样的光谱特征。针对这些情况已经有相当数量的研究对不同作物病虫害的光谱特征进行了报道^[12-15]。在水稻研究方面: Kobayashi等^[12]运用反射率光谱,在冠层和叶片2个尺度上对稻穗瘟(panicle blast)进行识别,研究表明,无论在室内还是在田间冠层,随病粒比例的增加,水稻光谱反射率在430~530、580~680和1480~2000 nm范围内均有所提高; Yang和 Cheng^[13]对受褐飞虱(brown planthopper)侵扰的水稻冠层光谱进行分析后发现,利用737~925 nm波段反射率的改变能够对植物是否受病害侵染做出较好诊断; Yang等^[14]发现,当水稻受褐飞虱和稻纵卷叶螟侵扰时,426 nm波段处的冠层光谱反射率能够有效地监测2种虫害; Liu等^[15]通过对水稻稻穗的光谱分析发现450~850 nm波段的反射率变化与水稻稻穗枯病(glume blight disease)具有相关性。在小麦研究方面: Graeff等^[16]通过对感染白粉病(powdery mildew)和全蚀病(take-all disease)的小麦叶片光谱进行分析后发现,病害的发生导致490、510、516、540、780和1300 nm波段处的强烈光谱响应; Delwiche和 Kim^[17]发现小麦赤霉病(Fusarium head blight)能够引起550、568、605、623、660、697、715和733 nm位置处的光谱响应; 黄木易等^[18]通过研究小麦条锈病的光谱特征,发现630~687, 740~890和976~1350 nm波段对条锈病敏感; 刘良云等^[19]发现小麦条锈病与560~670 nm波段的反射率变化有密切关系,并据此构建了监测模型; Moshou等^[20-21]通过光谱分析筛选出680、725和750这三个与小麦条锈病有关的光谱波段。在其他果蔬研究方面: Sasaki等^[22]发现黄瓜在受到*Colletotrichum orbiculare*病菌感染后会在380~450和750~1200 nm波段处出现吸收特征的改变; Zhang等^[23-24]发现番茄晚疫病(late blight disease)的发生能够引起700~750、750~930、950~1030和1040~1130 nm范围的光谱反射率的显著改变; Xu等^[25]

发现 800~1 100、1 450 和 1 900 nm 位置的光谱反射率对番茄斑潜蝇 (leaf miner damage) 的侵扰较敏感; Jones 等^[26]通过分析感染叶斑病(xanthomonas perforans) 的番茄叶片光谱发现在 395、633~635 和 750~760 nm 位置的反射率有显著改变; Naidu 等^[27]通过研究发现能够通过 752、684 和 970 nm 处的反射率对葡萄卷叶病 (leafroll disease) 进行识别和诊断; Wang 等^[28]发现能够用 1 150~1 280 nm 波段的反射率诊断洋葱的酸腐病 (sour skin disease)。Huang 等^[29]在监测芹菜菌核病时发现采用 400~1 300 nm 反射率可有效反应病菌侵染程度。图 1 和表 1 对上述光谱位置进行了归纳和总结。



注：参考已有文献报道资料^[12-14,16-29,38]，灰色部分为敏感波段。

图 1 作物病虫害光学遥感探测敏感波段分布图

Fig.1 Sensitive bands distribution for crop diseases and pests detection

表 1 作物病虫害探测相关光谱响应波段位置

Table 1 Locations of response wave band for correlated spectroscopy of crop diseases and pests detection

植物	病原	光谱响应波段/nm	文献
小麦	白粉病 (powdery mildew)	490, 510, 516, 540, 780, 1 300	[16]
	全蚀病 (take-all disease)		
小麦	赤霉病 (fusarium head blight)	550, 568, 605, 623, 660, 697, 715, 733	[17]
小麦	条锈病 (yellow rust)	680, 725, 750	[20-21]
小麦	条锈病 (yellow rust)	630~687, 740~890, 976~1 350	[18]
小麦	条锈病 (yellow rust)	560~670	[19]
水稻	褐飞虱 (brown planthopper)	737~925	[13]
水稻	褐飞虱 (brown planthopper)	426	[14]
	稻纵卷叶螟 (leaf folder)		
水稻	稻颖枯病 (glume blight disease)	450~850	[38]
水稻	稻瘟病 (rice panicles blast)	430~530, 580~680, 1 480~2 000	[12]
番茄	潜叶蛾 (leaf miner)	800~1 100, 1 450, 1 900	[25]
番茄	晚疫病 (late blight disease)	700~750, 750~930, 950~1 030, 1 040~1 130	[23-24]
番茄	细菌性叶斑病 (<i>xanthomonas perforans</i>)	395, 633~635, 750~760	[26]
洋葱	酸皮病 (sour skin disease)	1 150~1 280	[28]
芹菜	菌核病 (sclerotinia rot disease)	566~567, 677, 711~712, 757, 1 109~1 110, 1 203	[29]
黄瓜	炭疽病菌 (<i>colletotrichum orbiculare</i>)	380~450, 750~1 200	[22]
葡萄	卷叶病 (leafroll disease)	752, 684, 970	[27]

从上述研究可以看出，植物类型及染病种类不同，其光谱特征位置具有明显差异。笔者认为，如果能够对各种不同作物的常见病虫光谱特征位置进行全面研究，建立一个作物病虫害光谱特征数据库，将极大地丰富农业专家系统在病虫害监测与诊断方面的内涵。同时，便于数据交互和共享，为今后病虫害的监测提供信息支持。

3 应用于作物病虫害胁迫监测的植被指数

在病虫害遥感探测的研究与实践中，研究者们往往不直接使用光谱反射率，而是基于各种类型的植被指数进行分析。迄今为止，已有多种不同形式的植被指数被相继提出，通常具有一定的生物或理化意义，是植物光谱的一种重要的应用形式。除波段组合、插值、比值、归一化等常用的代数形式外，如光谱微分、连续统等变换形式也常用于光谱特征的构建。目前，

已有较多的研究尝试通过各类植被指数建立遥感信息和病虫害的发生、程度之间的关系。

在水稻研究方面：Yang 等^[14]采用绿度植被指数 (green normalized difference vegetation index, GNDVI) 和土壤调节植被指数 (soil-adjusted vegetation index, SAVI) 对水

稻病害进行监测，2 种指数与病情程度之间的决定系数均达到 0.8 以上。在小麦研究方面：Bravo 等^[30]利用归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)，采用判别分析提取小麦条锈病病情信息，准确率超过 95%；Zhao 等^[31]发现比值植被指数 (simple ratio, SR) 和三角形植被指数 (triangular vegetation index, TVI) 对诊断小麦病害有较好的效果；黄木易等^[32]发现经连续统去除法处理后的 540~740 nm 区间内的吸收深度 (depth) 和吸收面积 (area) 能够与小麦病叶的严重

度之间建立极显著的相关关系; Huang 等^[33]采用改正型叶绿素吸收比值指数 (the transformed chlorophyll absorption and reflectance index, TCARI) 和优化土壤调节植被指数 (optimized soil-adjusted vegetation index, OSAVI) 的组合对小麦病害条件下的色素变化进行监测, 决定系数达到 0.7795, 结果表明 TCARI 和 OSAVI 指数的比值能够与受条锈病侵染的小麦植株的部分生理生化参数建立良好的相关关系; 蒋金豹等^[34]通过实验研究发现在冠层尺度上, 红边核心区 (725~735 nm) 内一阶微分总和 (SDr') 与绿边核心区 (520~530 nm) 内一阶微分总和 (SDg') 的比值对小麦病害早期症状敏感, 与病情指数间相关系数达到 0.921, 表明微分植被指数 SDr'/SDg' 适用于小麦病害的早期诊断; Huang 等^[35]成功运用光化学植被指数 (photochemical reflectance index, PRI) 监测了小麦病害, 分别在冠层和航空观测尺度上达到了超过 90% 的估测精度; 此外, Devadas 等^[36]发现氮反射率指数 (nitrogen reflectance index, NRI), 结构不敏感植被指数

(structural independent pigment index, SIPI), 植被衰老指数 (plant senescence reflectance index, PSRI) 和归一化叶绿素比值指数 (normalized pigment chlorophyll ratio index, NPCI) 能够识别并进一步区分同种小麦病害的不同亚型。在其他果蔬研究方面: Steddom 等^[37]利用 NDVI、花青素反射指数 (anthocyanin reflectance index, ARI) 对甜菜病害进行了监测; Xu 等^[25]采用水体指数 (water band index, I_{WB}) 对番茄病虫害进行探测; Naidu 等^[27]尝试利用红边植被胁迫指数 (red-edge vegetation stress index, RVSI), 调节型叶绿素吸收比率指数 (modified chlorophyll absorption in reflectance index, MCARI), 可见光大气阻尼指数 (visible atmospherically resistance index, VARI) 及水分指数 (water index, WI) 对葡萄病害进行识别, 且识别效果达到极显著水平。表 2 对上述常用于病虫害探测的一些植被指数进行了归纳和整理。这些植被指数由于能够在不同程度上对作物的病虫害发生或程度敏感, 可为今后构建作物病虫害遥感监测模型提供借鉴。

表 2 作物病虫害探测相关常用植被指数

Table 2 Correlation common vegetation indices of crop diseases and pests detection

植被指数名称	表达式	文献出处
归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)	$NDVI = (R_{Nir} - R_{Red}) / (R_{Nir} + R_{Red})$	[13-14, 27, 30]
比值植被指数 (simple ratio, SR)	$SR = R_{Nir} / R_{Red}$	[31]
绿度归一化植被指数 (green normalized difference vegetation index, GNDVI)	$GNDVI = (R_{Green} - R_{Red}) / (R_{Green} + R_{Red})$	[14]
水分波段指数 (water band index, I _{WB})	$I_{WB} = R_{950nm} / R_{900nm}$	[25]
土壤调节植被指数 (soil-adjusted vegetation index, SAVI)	$SAVI = (R_{Nir} - R_{Red})(1+L) / (R_{Nir} - R_{Red} + L)$, L=0.5	[14]
光化学植被指数 (photochemical reflectance index, PRI)	$PRI = (R_{531nm} - R_{570nm}) / (R_{531nm} + R_{570nm})$	[27, 35]
三角形植被指数 (triangular vegetation index, TVI)	$TVI = 0.5 * [120 * (R_{750nm} - R_{550nm}) - 200 * (R_{670nm} - R_{550nm})]$	[31]
红边植被胁迫指数 (red-edge vegetation stress index, RVSI)	$RVSI = (R_{714nm} - R_{752nm}) / 2 - R_{733nm}$	[27]
改进型叶绿素吸收指数 (modified chlorophyll absorption in reflectance index, MCARI)	$MCARI = [(R_{700nm} - R_{670nm}) - 0.2 * (R_{700nm} - R_{550nm})] * R_{700nm} / R_{670nm}$	[27]
抗大气指数 (visible atmospherically resistance index, VARI)	$VARI = (R_{Green} - R_{Red}) / (R_{Green} + R_{Red} - R_{Blue})$	[27]
水分指数 (water index, WI)	$WI = R_{900nm} / R_{970nm}$	[27]
花青素反射指数 (anthocyanin reflectance index, ARI)	$ARI = 1 / R_{550nm} - 1 / R_{700nm}$	[37]
转换叶绿素吸收指数 (the transformed chlorophyll absorption and reflectance index, TCARI)	$TCARI = 3 * [(R_{700nm} - R_{670nm}) - 0.2 * (R_{700nm} - R_{550nm})] * R_{700nm} / R_{670nm}$	[33]
优化土壤调节植被指数 (optimized soil-adjusted vegetation index, OSAVI)	$OSAVI = 1.16 * [(R_{800nm} - R_{670nm}) / (R_{800nm} + R_{670nm} + 0.16)]$	[33]
氮反射率指数 (nitrogen reflectance index, NRI)	$NRI = (R_{570nm} - R_{670nm}) / (R_{570nm} + R_{670nm})$	[36]
结构不敏感植被指数 (structural independent pigment index, SIPI)	$SIPI = (R_{800nm} - R_{445nm}) / (R_{800nm} + R_{680nm})$	[36]
植被衰老指数 (plant senescence reflectance index, PSRI)	$PSRI = (R_{678nm} - R_{500nm}) / R_{750nm}$	[36]
归一化色素比率指数 (normalized pigment chlorophyll ratio index, NPCI)	$NPCI = (R_{680nm} - R_{430nm}) / (R_{680nm} + R_{430nm})$	[36]

注: R_{Blue} , R_{Green} , R_{Red} 和 R_{Nir} 分别表示蓝波段、绿波段、红波段和近红外波段反射率; R_{number} 表示某波长对应反射率值; R 均表示反射率。

4 作物病虫害胁迫遥感识别和程度区分算法

为实现对作物病虫害的遥感识别和程度区分, 除了需要选择合适的波段或植被指数外, 还需要选择合适的识别和区分算法, 以建立这些病情和光谱特征之间的关系。目前针对不同类型的病虫害以及

病虫害的不同特点, 研究者们提出了各种各样的方法和模型。大致可以分为 2 类: 一类是基于高光谱非成像数据建立的模型, 一类是基于图像的数据分析方法。这些方法涉及了多元统计分析, 数据挖掘算法和图像分析方法, 总的目的是为了使用所建立的模型具有较高的精度和专一性。

4.1 针对非成像光谱的病虫害遥感识别及区分算法

基于高光谱非成像数据的方法以统计和数据挖掘算法为主。在小麦病害方面：Graeff 等^[16]采用方差分析 (analysis of variance)，相关分析 (correlation analysis) 和回归分析 (regression analysis) 研究小麦条锈病和全蚀病病情程度与光谱特征之间的关系，并进行敏感波段筛选；Huang 等^[35]利用回归分析构建了小麦条锈病的病情程度反演模型。在水稻病虫害研究方面，近年来浙江大学环境与资源学院的黄敬峰研究团队运用包括主成分分析 (PCA)，概率神经网络 (PNN)，支持向量机 (SVM) 等多种数据挖掘算法进行光谱数据分析和模型构建，在水稻稻瘟病、稻纵卷叶螟、稻干尖线虫病、水稻胡麻斑病等多种病害的识别、监测方面开展了系列研究^[38-46]。如刘占宇等^[38]以红边面积和红边位置作为非线性软间隔分类机 (C-SVC) 的输入向量，在识别水稻干尖线虫胁迫叶片和健康叶片的研究中获得较高精度。李波等^[39]基于主成分分析技术 (PCA) 和概率神经网络 (PNN) 对稻干尖线虫病和稻纵卷叶螟进行识别，识别精度高达 95.65%，研究表明将 PCA 和 PNN 相结合，可以实现对多种水稻病虫害进行快速、精确的分类识别。在其他果蔬研究方面：Huang 等^[29]利用偏最小二乘回归 (PLSR) 方法，对受到菌核病感染的芹菜叶片原始光谱及经光谱变化的一阶和二阶微分光谱进行建模分析，以预测其感病概率，结果表明两种模型精度均达到 80% 以上，分别为 89% 和 87%；Xu 等^[25]采用回归分析对受番茄斑潜蝇侵扰的番茄植株进行了研究，所建立的估测模型精度达到 0.982，能够很好的预测病害发生严重程度；Costa 等^[47]采用主成分变换 (principal component analysis) 后的光谱信号进行猕猴桃的灰霉病 (gray mold) 和核盘霉病 (sclerotinia rot) 的早期诊断，效果显著；Naidu 等^[27]采用判别分析 (discriminant analysis) 能够在早期对葡萄卷叶病进行诊断；Liu 等^[48]比较了多元逐步回归 (multiple stepwise regression)、主成分分析和偏最小二乘回归 (partial least squares regression) 在估算水稻胡麻叶斑病 (brown spot disease) 严重程度时的表现，研究发现：利用偏最小二乘回归分析估测病害严重程度，精度在 95% 以上，其次是多元逐步回归分析，精度在 90% 以上，最差的是主成分分析法，估算精度低于 90%；Liu 等^[15]针对水稻颖枯病的光谱采用主成分分析，方差分析进行病害特征提取，并采用人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 方法进行分类和识别；Jones 等^[49]在叶片尺度上利用偏最小二乘回归和多元逐步回归建立预测模型以探测番茄叶斑病，所得模型均方根误差为 0.049，

决定系数为 0.82，结果表明光谱技术可为番茄叶斑病监测提供有效方法；Rumpf 等^[50]利用支持向量机 (support vector machine) 算法对甜菜感染 *Cercospora beticola* 的病叶光谱进行分析，成功建立了高精度的病斑识别模型；Muhammed 和 Larsolle^[51]，以及 Muhammed^[52]结合独立成分分析 (independent component analysis) 和主成分分析对小麦褐斑病 (tan spot disease) 进行研究，达到较好的效果。通过上述研究可以看到，基于高光谱非成像数据的研究方法主要是通过各种统计判别、回归模型或数据挖掘算法建立光谱特征与病虫害类型、病情程度之间的关系。

4.2 针对成像光谱的病虫害遥感识别及区分算法

近年来，使用成像光谱分析作物病虫害的研究报道不断增多，并且逐渐从叶片，近地成像尺度扩展到航空甚至航天的观测尺度。在这些研究中，研究者所使用的分析和建模方法侧重于对图像中光谱和空间的变异信息进行提取。如 Delwiche 和 Kim^[17]基于逐步判别分析 (step discrimination) 和图像机器视觉方法对小麦赤霉病进行了区分和识别，结果表明高光谱图像在小麦赤霉病的探测方面具有较大潜力；Zhang 等^[23-24]通过对图像进行最小噪声分离变换 (minimum noise fraction transformation) 和光谱角度制图 (spectral angle mapping) 等处理，成功从航空图像中提取了番茄晚疫病的信息；Moshou 等^[20-21]结合自组织图 (self-organizing map)，神经网络 (neural network) 以及二次判别分析 (quadratic discriminant analysis) 在冠层尺度利用光谱图像识别提取了小麦条锈病的信息，准确度达到 95% 以上；Huang 等^[35]基于航空高光谱图像，利用回归分析技术成功建立了小麦条锈病的严重程度反演模型，并通过分析冠层、田块两个尺度的数据，初步验证了基于高光谱特征将病害监测模型从冠层尺度扩展到地块尺度的可能性；Qin 等^[53]利用主成分分析对柑橘溃皮病进行识别，总体精度达到 92.7%；Wang 等^[28]通过图像分析提取了洋葱酸腐病的信息；Sighicell 等^[54]结合光谱和荧光探测技术，探测了甜橙的青霉 (blue mold) 及褐腐病 (browning rot) 等病症，并得出由于植株体早期叶绿素和酚类物质的变化可引起反射率和荧光信号改变的结论；Yang 等^[55]采用主成分分析和交互自组织数据分析技术 (interactive self-organizing data analysis, ISODATA) 分别在高分辨率多光谱和高光谱航空影像中提取了棉花根腐病的发生范围，结果显示 2 类数据监测结果的精度差别并不显著，表明多光谱数据具有大范围病害监测的应用潜力。在卫星影像水平上，Jonas 和 Menz^[56]

基于 Quickbird 影像, 利用光谱角度制图和混合调谐滤波算法 (mixture tuned matched filtering algorithm) 进行了小麦白粉病和条锈病的识别。表 3 分别按照成像和非成像 2 种模式对已有病虫害光

谱探测研究的相关算法进行总结。这些方法为病虫害遥感探测的应用提供了丰富的经验, 但是, 如何发展准确、简便、快速, 标准化程度高, 且仪器开发成本低的有效方法仍需要进行更多的尝试。

表 3 作物病虫害光谱探测相关算法或方法

Table 3 Correlation algorithms and methodologies of spectral detection for crop diseases and pests

遥感方式	植物	病害名称	分析方法	文献
非成像	小麦	白粉病; 全蚀病 (powdery mildew; take-all disease)	方差分析, 相关和回归分析 analysis of variance, correlation analysis and regression analysis	[16]
	小麦	条锈病 (yellow rust)	回归 regression	[35]
	小麦	黄斑病 (tan spot disease)	独立成分分析, 主成分分析 independent component analysis, Principal component analysis	[51-52]
	水稻	褐飞虱; 稻纵卷叶螟 (brown planthopper; leaf folder)	线性回归分析 linear regression models	[14]
	水稻	褐斑病 (brown spot disease)	多元逐步回归, 主成分分析, 偏最小二乘回归 multiple stepwise regression, principal component analysis, partial least squares regression	[40]
	水稻	稻纵卷叶螟 (rice leaf roller)	支持向量机 support vector machine	[43]
	水稻	稻瘟病 (rice panicles blast)	概率神经网络 probabilistic neural network	[39]
	水稻	稻颖枯病 (glume blight disease)	主成分分析, 方差分析, 人工神经网络 principal component analysis, analysis of variance, artificial neural network	[38]
	番茄	潜叶蛾 (leaf miner)	回归分析 regression	[25]
	番茄	细菌性叶斑病 (<i>xanthomonas perforans</i>)	多元逐步分析, 偏最小二乘回归 multiple stepwise regression, partial least squares regression	[26]
	甜菜	褐斑病 (<i>cercospora beticola</i>)	支持向量机 support vector machine	[50]
	芹菜	菌核病 (<i>sclerotinia rot disease</i>)	偏最小二乘回归 partial least squares regression	[29]
	猕猴桃	灰霉病; 菌核病 (gray mold; <i>sclerotinia rot</i>)	主成分分析 principal component analysis	[47]
	葡萄	卷叶病 (leafroll disease)	判别分析 discriminant analysis	[27]
成像	小麦	赤霉病 (<i>fusarium head blight</i>)	逐步判别分析 step discrimination and discriminant analysis	[17]
	小麦	条锈病 (yellow rust)	自组织图, 神经网络, 二次判别分析 self-organizing map, neural network, quadratic discriminant analysis	[20-21]
	小麦	条锈病 (yellow rust)	回归分析 regression	[35]
	小麦	条锈病; 白粉病 (yellow rust; powdery mildew)	光谱角度制图, 混合调谐滤波 spectral angle mapping, mixture tuned matched filtering algorithm	[56]
	番茄	晚疫病 (late blight disease)	最小噪声去除, 光谱角度制图 minimum noise fraction transformation and spectral angle mapping-based classification	[23-24]
	棉花	根腐病 (root rot)	主成分分析, 交互自组织数据分析 principal component analysis, interactive self-organizing data analysis	[55]
	柑橘	柑橘溃疡 (citrus canker)	主成分分析 principal component analysis	[53]
	洋葱	酸皮病 (sour skin disease)	图像分析 image analysis	[28]
	甜橙	霜霉病; 褐腐病 (blue mold; browning rot)	波段差异分析 difference in reflectance	[54]

5 现存的问题和未来的发展趋势

在未来, 随着理论和各类技术的进一步成熟, 遥感技术将对大范围的作物病虫害监测预报产生更为重要的影响。笔者通过在国际科技论文综合性检索平台中对最近 20 年有关作物病虫害光谱分析及遥感应用方面的学术出版物进行检索, 得到近 20 年的年纪动态图 (图 2)。图中一个明显的趋势即作物病虫害光谱分析及遥感监测相关出版物数量

近年来呈迅速上升的态势, 特别是在 2000 年之后增速较快。这一方面与国际科技出版界的整体发展有关, 同时也体现了将遥感技术与作物病虫害监测相结合逐渐受到众多学者的广泛关注。在这些研究中, 下述 5 个关键词出现的频次最高: “vegetation index”, “canopy reflectance”, “neural network”, “chlorophyll content”, “precision agriculture”。这些关键词反映了多数学者希望通过光谱特征和一些统计分析方法将遥感信息与病情相联系, 从而推进

精准农业作业应用的意愿。另一方面，通过调研国际上提供精准农业服务的一些知名企业，如“SST Software”，“Precision AG”，“General Dynamics Advanced Information Systems”，“Ball Aerospace & Technologies Crop”，发现作物病虫害遥感监测在实践中大多仅限于农机平台自身装载的传感器，较少在大范围中提供病虫害监测服务。虽然部分学者，如 Huang 等^[35]，Jonas 和 Menz^[56]，对机载、星载平台的病害监测应用进行过一些成功的尝试，但由于数据获取不易或成本过高等原因，暂未能在生产实践中普及。此外，上述这些研究多需要丰富的先验知识，而对于作物在密度、品种、播期、管理等方面的影响未进行系统分析。

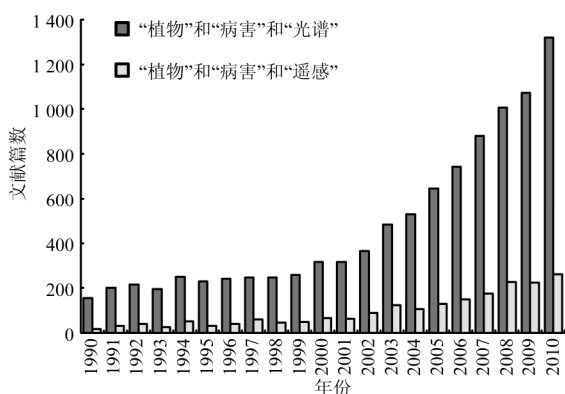


图 2 作物病虫害光谱分析及遥感应用与相关出版物数量
年动态变化

Fig.2 Dynamic changes between number of correlated publications and crop diseases and pests detection by means of remote sensing and spectrum

在对目前作物病虫害遥感监测的研究、应用情况进行了一番梳理后，笔者认为，这一领域目前的重要问题和未来的发展趋势主要体现在下述几个方面：

1) 对病虫害光谱特征的专属性认识不足。作物病虫害由于和作物的其它胁迫（如养分胁迫）具有相似的生理机制，往往容易出现相类似的光谱特征，而对某些局部的病虫害专属性光谱特征的认识能够为在复杂的农田环境中将作物病虫害区域识别和分离出来提供依据，对病虫害遥感监测的实际应用具有重要意义。

2) 针对多样化的作物病虫害类型缺乏比较研究。目前的研究虽已涉及较多类型，但总体上仍缺乏对某些重要病虫害的认识（如对危害较重和流行度较高的小麦白粉病、赤霉病等病害类型的研究相对稀少），更缺乏对各种病虫害类型中一些具代表性的病虫害类型的光谱响应特征进行比较、归纳和总结，因而缺乏进行分型识别的基础依据。

3) 将多时相遥感影像用于大范围的作物病害监测亟待加强。作物病虫害的发生发展不仅会体现在光谱特征相对于正常的偏离，有时某些光谱特征所形成的时间特征会体现出更为显著的信号。早期的星载遥感数据难以同时满足空间分辨率和时间分辨率的要求，这对此方面的研究构成了硬件条件的障碍，但近年来随着如环境减灾卫星等一些中分辨率高重访周期数据的出现，对病虫害的遥感多时相监测提供了重要契机。而多时相数据的预处理，时间维信息的提取，遥感时空信息与病虫害发生间关系的建立等则是实现多时相病虫害遥感监测所需要解决的具体问题。

4) 将多种类型遥感数据配合使用进行病虫害监测。对作物病虫害进行监测除了传统光学遥感数据外，还可以尝试结合主动光学技术，热红外数据和荧光数据等多源信息，进行综合分析和建模。目前多数光学遥感病虫害监测方法基于被动光学遥感系统设计，受天气影响较大。未来大田尺度的病虫害遥感监测和诊断可引入主动光学遥感的探测方式，减小方法对时相、天气条件的依赖。Mishra 等^[57]发展了一种覆盖可见光、近红外波段的四波段调制式主动光学传感器对柑橘黄龙病进行监测，结果表明该系统可在冠层尺度实现对病害较准确的识别。作物受病害影响会发生气孔导度变化，从而引起呼吸、蒸腾作用等强度改变，通常使冠层温度升高。而热红外遥感数据由于能够捕捉物体热辐射强度的变化，因此具有病害探测的潜力。另一方面，作物叶绿素荧光信号是植株光合作用强度的良好指示器。病害引起的植物光合活性的改变能够通过叶绿素荧光的方式被仪器探测到。Kuckenberg 等^[58]尝试将叶绿素荧光诱导技术应用于不同胁迫的区分研究，发现 F690/F730 这一荧光特征能有助于区分冬小麦白粉病、叶锈病和缺氮胁迫。Römer 等^[59]结合支持向量机分析，探讨叶片尺度荧光信号对小麦叶锈病早期监测的潜力，结果表明识别精度达到 93%。与光谱数据不同，热红外遥感数据和荧光遥感数据能够捕捉作物瞬时的生理状态，因此可以从不同的角度为病害探测提供有效信息。如 Stoll 等^[60]利用热红外成像技术，对早期葡萄霜霉病进行监测，结果表明热成像仪可捕捉病菌感染早期的叶温变化，从而实现病害的早期监测，提高农药使用效率。目前，随着热红外遥感和荧光遥感相关仪器技术的不断成熟，这一方面的研究亟待加强。

5) 结合遥感技术和传感器网络构建全国性作物病虫害实时监测与服务平台。目前，随着物联网技术的兴起和发展，遥感和传感技术结合成为精细农业发展的趋势。与作物估产、品质预报和长势诊

断不同, 作物病虫害具有类型多样, 影响因素复杂多变, 发生发展迅速的特点。因此, 局部的研究和应用难以全面覆盖病虫害发生的热点区域, 从而往往在病害发生的关键时期不能迅速响应, 失去病害监测的先机。遥感数据能够提供面状连续的数据, 而在某些关键地区布设无线传感器网络, 则能够提供点状的连续时相的数据。Morais 等^[61]将 ZigBee 基础引入葡萄栽培的精准管理, 在病害实时监测和产量估测方面进行了应用示范。从病害监测未来的发展趋势看, 将遥感和传感两种数据相互配合, 则能够很好地优势互补, 点面结合, 为病害监测提供丰富而全面的信息。而基于 WebGIS 技术的全国尺度作物病虫害信息库和服务平台的建立, 能够方便用户通过专家系统进行病情诊断或咨询, 以及不同地区之间的信息共享, 实现对农业病虫害的实时监控和有效控制^[62]。

6 结 论

随着农业信息化革命的不断深入, 利用遥感技术进行作物病害信息提取正从理论逐步走向应用。不断涌现的各类数据源以及数据挖掘方法为病害遥感监测提供了丰富的资源。本篇综述分别从数据源、光谱特征以及算法等几个方面总结和梳理了目前遥感技术在作物病害监测方面的应用情况, 并提出了这些技术和方法在未来的发展方向。目前, 病虫害遥感监测总体上与生产管理的实际应用仍存在着不小的距离, 受多种农田环境的复杂性因素影响, 监测结果可靠性低, 精度难以保证。而这些问题的解决, 需要将农学和植保经验知识与遥感信息与模型进行有效整合, 以充分挖掘遥感技术在作物病害监测方面的潜力, 使得技术和方法在应用中不断走向成熟。

[参 考 文 献]

- [1] Strange R N, Scott P R. Plant Disease: A threat to global food security[J]. Annual reviews phytopathol, 2005, 43: 83—116.
- [2] 霍治国, 刘万才, 邵振润, 等. 试论开展中国农作物病虫害危害流行的长期气象预测研究[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 117—121.
Huo Zhiguo, Liu Wancai, Shao Zhenrun, et al. On developing long term meteorological prediction research of crop pests and diseases prevailing in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(1): 117—121. (in Chinese with English abstract)
- [3] 程家安, 祝增荣. 2005 年长江流域稻区褐飞虱暴发成灾原因分析[J]. 植物保护, 2006, 32(4): 1—4.
Cheng Jia'an, Zhu Zengrong. Analysis on the key factors causing the outbreak of brown planthopper in Yangtze Area, China in 2005[J]. Plant Protection, 2006, 32(4): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [4] Gabrynowicz J I. The work of the US National Satellite Land Remote Sensing Data Archive Advisory Committee: 1998-2000[J]. Space Policy, 2001, 17(1): 49—53.
- [5] Weng Q H. Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications[M]. CRC Press, 2011.
- [6] 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] 黄文江. 作物病害遥感监测机理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
- [8] Cheng T, Rivard B, Sánchez-Azofeifa A, et al. Continuous wavelet analysis for the detection of green attack damage due to mountain pine beetle infestation[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(4): 899—910.
- [9] Zhang J C, Luo J H, Huang W J, et al. Continuous wavelet analysis based spectral feature selection for winter wheat yellow rust detection[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2011, 17(5): 531—540.
- [10] Zhang J C, Pu R L, Huang W J, et al. Using in-situ hyperspectral data for detecting and discriminating yellow rust disease from nutrient stresses[J]. Field Crops Research, 2012, 134: 165—174.
- [11] Zhang J C, Pu R L, Wang J H, et al. Detecting powdery mildew of winter wheat using leaf level hyperspectral measurements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 85: 13—23.
- [12] Kobayashi T, Kanda E, Kitada K. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners[J]. The American Phytopathological Society, 2001, 91(3): 316—323.
- [13] Yang C M, Cheng C H. Spectral characteristics of rice plants infested by brown planthoppers[J]. Proceedings of the National Science Council Republic of China Part B Life Sciences, 2001, 25(3): 180—186.
- [14] Yang C M, Cheng C H, Chen R K. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leafhopper[J]. Crop Science, 2007, 47(1): 329—335.
- [15] Liu Z Y, Wu H F, Huang J F. Application of neural networks to discriminate fungal infection levels in rice panicles using hyperspectral reflectance and principal components analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(2): 99—106.
- [16] Graeff S, Link J, Claupein W. Identification of powdery mildew (*Erysiphe graminis* sp. *tritici*) and take-all disease (*Gaeumannomyces graminis* sp. *tritici*) in wheat (*Triticum aestivum* L.) by means of leaf reflectance measurements[J]. Central European Journal of Biology, 2006, 1(2): 275—288.
- [17] Delwiche S R, Kim M S. Hyperspectral imaging for detection of scab in wheat[J]. Biological Quality and Precision Agriculture II, 2000, 4203: 13—20.

- [18] 黄木易, 王纪华, 黄文江, 等. 冬小麦条锈病的光谱特征及遥感监测[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 154—158. Huang Muyi, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Hyperspectral character of stripe rust on winter wheat and monitoring by remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 154—158. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘良云, 黄木易, 黄文江, 等. 利用多时相的高光谱航空图像监测冬小麦条锈病[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 275—281. Liu Liangyun, Huang Muyi, Huang Wenjiang, et al. Monitoring stripe rust disease of winter wheat using multi-temporal hyperspectral airborne data[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(3): 275—281. (in Chinese with English abstract)
- [20] Moshou D, Bravo C, West J, et al. Automatic detection of 'yellow rust' in wheat using reflectance measurements and neural networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(3): 173—188.
- [21] Moshou D, Bravo C, Oberti R, et al. Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps[J]. Real-Time Imaging, 2005, 11(2): 75—83.
- [22] Sasaki Y, Okamoto T, Imo K, et al. Automatic diagnosis of plant disease: Recognition between healthy and diseased leaf [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1999, 61(2): 119—126.
- [23] Zhang M H, Qin Z H, Liu X, et al. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geo Information, 2003, 4(4): 295—310.
- [24] Zhang M H, Qin Z H, Liu X. Remote sensed spectral imagery to detect late blight in field tomatoes[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(6): 489—508.
- [25] Xu H R, Ying Y B, Fu X P, et al. Near-infrared spectroscopy in detection leaf miner damage on tomato leaf[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 447—454.
- [26] Jones C D, Jones J B, Lee W S. Diagnosis of bacterial spot of tomato using spectral signatures[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 329—335.
- [27] Naidu R A, Perry E M, Pierce F J, et al. The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus-3 in two red-berried wine grape cultivars[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(1): 38—45.
- [28] Wang W, Thai C, Gitaitis R, et al. Detecting of sour skin diseases in *Vidalia* sweet onions using near-infrared hyperspectral imaging. 2009 ASABE Annual International Meeting, Reno, NV, 2009, Paper No.096364.
- [29] Huang, J F, Apan, A. Detection of sclerotinia rot disease on celery using hyperspectral data and partial least squares regression[J]. Journal of Spatial Science, 2006, 52(2): 129—142.
- [30] Bravo C, Moshou D, West J S, et al. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(2): 137—145.
- [31] Zhao C J, Huang M Y, Huang W J, et al. Analysis of winter wheat stripe rust characteristic spectrum and establishing of inversion models[J]. IGARSS, 2004, 6, 4318—4320.
- [32] 黄木易, 黄文江, 刘良云, 等. 冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 176—180. Huang Muyi, Huang Wenjiang, Liu Liangyun, et al. Spectral reflectance feature of winter wheat single leaf infected with stripe rust and severity level inversion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 176—180. (in Chinese with English abstract)
- [33] Huang W J, Huang M Y, Liu L Y, et al. Inversion of the severity of winter wheat yellow rust using proper hyper spectral index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(4): 97—103.
- [34] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 等. 用高光谱微分指数监测冬小麦病害的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(12): 2475—2479. Jiang Jinbao, Chen Yunhao, Huang Wenjiang, et al. Using hyperspectral derivative index to monitor winter wheat disease[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(12): 2475—2479. (in Chinese with English abstract)
- [35] Huang W J, Lamb D W, Niu Z, et al. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging[J]. Precision Agriculture, 2007, 8(5): 187—197.
- [36] Devadas R, Lamb D W, Simpfendorfer S, et al. Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves[J]. Precision Agriculture, 2009, 10(6): 459—470.
- [37] Steddom K, Heidel G, Jones D. Remote detection of rhizomania in sugar beets[J]. Phytopathology, 2003, 93(6): 720—726.
- [38] 刘占宇, 石晶晶, 王大成, 等. 稻干尖线虫病胁迫水稻叶片波谱响应特征及识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 710—713. Liu Zhanyu, Shi Jingjing, Wang Dacheng, et al. Discrimination and spectral response characteristic of stress leaves infected by rice *aphelenchoides besseyi* christie[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 710—713. (in Chinese with English abstract)
- [39] 李波, 刘占宇, 黄敬峰, 基于 PCA 和 PNN 的水稻病虫害高光谱识别[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 143—147. Li Bo, Liu Zhanyu, Huang Jingfeng, et al. Hyperspectral identification of rice diseases and pests based on principal component analysis and probabilistic neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 143—147. (in Chinese with English abstract)
- [40] 刘占宇, 孙华生, 黄敬峰. 基于学习矢量量化神经网络的水稻白穗和正常穗的高光谱识别[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 664—668.
Liu Zhanyu, Sun Huasheng, Huang Jingfeng. Classification of empty and healthy panicles in rice plants by hyperspectral reflectance based on learning vector quantization (LVQ) Neural Network[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(6): 664—668. (in Chinese with English abstract)
- [41] 黄敬峰, 王福民, 王秀珍. 水稻高光谱遥感实验研究[M]. 浙江大学出版社, 2010.
- [42] 刘占宇, 黄敬峰, 陶荣祥, 等. 基于主成分分析和径向基网络的水稻胡麻斑病严重度估测[J]. 光谱学与光谱分, 2008, 28(9): 2156—2160.
Liu Zhanyu, Huang Jingfeng, Tao Rongxiang, et al. Estimating rice brown spot disease severity based on principal component analysis and radial basis function neural network[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(9): 2156—2160. (in Chinese with English abstract)
- [43] 石晶晶, 刘占宇, 张莉丽, 等. 基于支持向量机(SVM)的稻纵卷叶螟危害水稻高光谱遥感识别[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(3): 331—334.
Shi Jingjing, Liu Zhanyu, Zhang Lili, et al. Hyperspectral recognition of rice damaged by rice leaf roller based on support vector machine[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(3): 331—334. (in Chinese with English abstract)
- [44] 李波, 刘占宇, 武洪峰, 等. 基于概率神经网络的水稻穗颈瘟高光谱遥感识别初步研究[J]. 科技通报, 2009, 25(6): 811—815.
Li Bo, Liu Zhanyu, Wu Hongfeng, et al. Differentiation of rice panicles blast by hyperspectral remote sensing based on probabilistic neural network[J]. Bulletin of Science and Technology, 2009, 25(6): 811—815. (in Chinese with English abstract)
- [45] 刘占宇, 王大成, 李波, 等. 基于可见光/近红外光谱技术的倒伏水稻识别研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(5): 342—345.
Liu Zhanyu, Wang Dacheng, Li Bo, et al. Discrimination of lodged rice based on visible/near infrared spectroscopy[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(5): 342—345. (in Chinese with English abstract)
- [46] Liu ZY, Shi JJ, Zhang LW, et al. Discrimination of rice panicles by hyperspectral reflectance data based on principal component analysis and support vector classification[J]. Journal of Zhejiang University-Science B: Biomedicine and Biotechnology, 2010, 11(1): 71—78.
- [47] Costa G, Noferini M, Fiori G, et al. Innovative application of non-destructive techniques for fruit quality and disease diagnosis[J]. Acta Horticulturae, 2007, 753(1): 275—282.
- [48] Liu Z Y, Huang J F, Shi J J, et al. Characterizing and estimating rice brown spot disease severity using stepwise regression, principal component regression and partial least-square regression[J]. Journal of Zhejiang University-Science B: Biomedicine and Biotechnology, 2007, 8(10): 738—744.
- [49] Jones C D, Jones J B, Lee W S. Diagnosis of bacterial spot of tomato using spectral signatures[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 329—335.
- [50] Rumpf T, Mahlein A K, Steiner U, et al. Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(1): 91—99.
- [51] Muhammed H H, Larsolle A. Feature vector based analysis of hyperspectral crop reflectance data for discrimination and quantification of fungal disease severity in wheat[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(2): 125—134.
- [52] Muhammed H H. Hyperspectral crop reflectance data for characterising and estimating fungal disease severity in wheat[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(1): 9—20.
- [53] Qin J, Burks T F, Kim M S, et al. Citrus canker detection using hyperspectral reflectance imaging and PCA-based image classification method[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2008, 2(3): 168—177.
- [54] Sighicell M, Colao F, Lai A, et al. Monitoring post-harvest orange fruit disease by fluorescence and reflectance hyperspectral imaging[J]. ISHS Acta Horticulturae, 2009, 817: 277—284.
- [55] Yang C H, Everitt J H, Fernandes C J. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for mapping cotton root rot[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(2): 131—139.
- [56] Jonas F, Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing[J]. Precision Agriculture, 2007, 8(3): 161—172.
- [57] Mishra A, Karimi D, Ehsani R, et al. Evaluation of an active optical sensor for detection of Huanglongbing (HLB) disease[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 302—309.
- [58] Kuckenberg J, Tartachnyk I, Noga G. Detection and differentiation of nitrogen-deficiency, powdery mildew and leaf rust at wheat leaf and canopy level by laser-induced chlorophyll fluorescence[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(2): 121—128.
- [59] Römer C, Bürling K, Hunsche M, et al. Robust fitting of fluorescence spectra for pre-symptomatic wheat leaf rust detection with Support Vector Machines[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 180—188.
- [60] Stoll M, Schultz H R, Baecker G, et al. Early pathogen detection under different water status and the assessment of

- spray application in vineyards through the use of thermal imagery[J]. *Precision Agriculture*, 2008, 9(6): 407—417.
- [61] Morais R, Fernandes M A, Matos S G, et al. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 62(2): 94—106.
- [62] 张竞成. 多源遥感数据小麦病害信息提取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学环境与资源学院, 2012.
- Zhang Jincheng. *Methods for Information Extraction of Wheat Disease Based on Multi-source Remote Sensing Data*[D]. Hangzhou: College of Environment and Resources of Zhejiang University, 2012.

Research progress of crop diseases and pests monitoring based on remote sensing

Zhang Jingcheng^{1,2}, Yuan Lin^{1,2}, Wang Jihua^{1,2}, Luo Juhua¹, Du Shizhou¹,
Huang Wenjiang^{1,3*}

(1. *Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;*

2. *College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;*

3. *Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)*

Abstract: For the monitoring of crop diseases and pests, traditional methods are still commonly used for data collection such as manual inspection and field sampling. However, these methods are not only time consuming, labor intensive, but also lack of generality and effectiveness, and tend to be subjective, which cannot satisfy the real-time monitoring of crop diseases and pests over vast area. Recently, the development of remote sensing provided an important mean for large area and rapidly obtaining crops and environmental information. This method showed a promising potential as an alternative method to traditional methods in disease monitoring, forecasting and yield loss assessment. Based on the description of physiological mechanism that crop diseases and pests stressed spectral response, some effective spectral wavelengths, and vegetation indices for crop diseases or pests monitoring were summarized and sorted. In addition, a number of algorithms used to identify diseases and pests identification, to monitor their severity, and to assess yield loss were also reviewed. Then, challenge problems of key technology on monitoring crop diseases and pests with remote sensing was also pointed out, and some possible solutions and tendencies how to realize large area monitoring the crops diseases and pests in future were also provided.

Key words: remote sensing, diseases, pest control, crops, spectral characteristic bands, vegetation index